



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# TEOLLISUUSLAITOKSEN SÄHKÖNLAATUSELVITYS

TEKIJÄ: Juha Haataja

Koulutusala			
Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma			
Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä			
Juha Haataja			
Työn nimi			
Teollisuuslaitoksen sähkönlaatuselvitys.			
Päiväys	4.6.2015	Sivumäärä/Liitteet	35/4
Ohjaajat			
lehtori Jari Ijäs ja lehtori Esko Pöllänen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani			
Kuopion Woodi OY			
Tiivistelmä			
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Kuopion Woodi Oy:n tehdashallien pienjänniteverkon sähkönlaatua. Työn lähtökohtana oli määritellä sähkönlaadun ongelmia, joita ovat taajuushäiriöt, jännitehäiriöt, yliaallot, resonanssi ja toimitusvarmuus ja keskeytykset. Näiden määritykset olivat tarpeen, koska oli ilmennyt sähkönlaatuun liittyviä ongelmia. Ongelmat olivat ilmenneet tehtaalle tulleissa sähkölaskuissa, joissa on laskutettu loistehon suuruuden vuoksi ylimääristä. Tästä syystä työssä perehdyttiin Kuopion Woodi Oy:n verkkoon sekä verkkoyhtiön laskutustapaan.</p> <p>Työssä perehdytään sähköverkon ominaisuuksiin ja selvitetään teoriapohjaisesti sähköverkon tehoja sekä kompensointia. Tehoista käytiin läpi pätö-, lois-, näennäis- sekä säröteho. Kompensoinnista käytiin läpi kompensoinnin periaatteita ja kompensointilaitteita.</p> <p>Työssä käsitellään tämänhetkisiä laitteita, kuten muuntajaa, keskuksia ja kompensointia. Muuntajasta taulukoitiin kilpiarvot. Keskuksista selvitettiin niihin tulevat syötöt kuin niistä lähtevät laitteistot. Kompensoinnista selvitettiin tekniset tiedot. Tämänhetkisten laitteiston tietojen perusteella tehtiin laskelmia, joissa tehtiin sähkönlaadun ongelmien arviointi.</p> <p>Mittauksia tehtiin Fluke 434 -analysaattorilla. Mittauksilla kartoitettiin mahdollisia ongelmatilanteita ja joiden perusteella arvioitiin sähkönlaadun ongelmia. Työn tuloksena esitettiin mittauksen ja laskennan perusteella selvinneet ongelmat sekä näihin ongelmiin korjausehdotus.</p>			
Avainsanat			
sähkönlaatu, tehot, kompensointi			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author Juha Haataja			
Title of Thesis Quality Report on Electricity in an Industrial Plant.			
Date	4 June, 2015	Pages/Appendices	35/4
Supervisors Mr. Jari Ijäs, Senior Lecturer and Mr. Esko Pöllänen, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Kuopion Woodi OY			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of the final year project was to find out the power quality of the factory halls of Kuopion Woodi Ltd. The starting point was to identify quality problems of electrical power, like frequency interference, voltage events, harmonics, resonance and supply and interruptions. There have been problems related to electrical power quality and they have been billed due to the amount of extra reactive power. Therefore this work focuses on Kuopion Woodi Ltd's network and the network company's billing method.</p> <p>The thesis focuses on the features of the electricity system, explaining the theory of power, as well as compensation, including active, reactive, apparent, and distortion power and compensation principles and compensation devices. The work discusses the devices currently used, like transformer switchboards and compensation. The rated values of the transformer are given in a table. The supply to the switchboards and devices leading from the switchboards were found out and technical details of compensation were clarified. Based on current hardware data, calculations were made in which the quality problems of electrical power were assessed. Measurements were made with Fluke 434 analyzer. Potential problem situations were identified and assessment of electrical power quality problems was made.</p> <p>As a result of project the problems proven by measurements and calculations were shown and a proposal for correcting these problems was made.</p>			
Keywords electrical power quality, power, compensation			

# SISÄLTÖ

MÄÄRITELMIÄ .....	6
1 JOHDANTO .....	7
2 STANDARDIT .....	8
3 SÄHKÖNLAATU .....	10
3.1 Häiriöt .....	10
3.2 Taajuus .....	11
3.3 Jännite .....	11
3.4 Yliaallot .....	12
3.4.1 Harmoniset yliaallot .....	13
3.4.2 Epäharmoniset yliaallot .....	14
3.5 Resonanssi .....	14
3.5.1 Sarjaresonanssi .....	14
3.5.2 Rinnakkaisresonanssi .....	15
3.6 Jännitesärö .....	15
3.7 Jännitteen epäsymmetria .....	16
3.8 Transienttiylijännite .....	16
3.9 Toimitusvarmuus ja keskeytykset .....	17
3.10 Käyttötaajuiset ylijännitteet .....	17
4 SÄHKÖVERKON TEHOT .....	18
4.1 Pätöteho .....	18
4.2 Loisteho .....	18
4.3 Näennäisteho .....	19
4.4 Säröteho .....	19
5 LOISTEHON KOMPENSOINTI .....	20
5.1 Kompensoinnin periaatteet .....	20
5.1.1 Keskitetty kompensointi .....	21
5.1.2 Laiteryhmän kompensointi .....	21
5.1.3 Yksittäinen laitteen kompensointi .....	21
5.2 Kompensointilaitteita .....	21

6	SÄHKÖVERKON OMINAISUUDET.....	23
6.1	Muuntaja.....	23
6.2	Keskukset.....	25
6.3	Kompensointi.....	25
7	LASKELMAT .....	27
8	MITTAUKSET .....	29
8.1	Suunnitelmat .....	29
8.2	Fluke 434 -mittari.....	29
8.3	Suoritukset.....	30
8.4	Tulokset.....	30
9	YHTEENVETO.....	34
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT.....	35
	LIITE 1: MITTAUSTULOKSET .....	36

## MÄÄRITELMIÄ

Määritelmissä on määritelty opinnäytetyössä esiintyviä termejä.

Opinnäytetyössä esiintyviä termejä:

Käsite	Tunnus	Määritelmä tai selitys
Taajuus	$f$	$f = \frac{1}{T}; T = \text{jakson aika}$
Perustaajuus	$f_1$	$f_1 = 50 \text{ Hz}$
Yliaallon järjestysluku	$n$	$n = 2, 3, 4, \dots$
Harmonisen yliaallon taajuus	$f_n$	$f_n = n * f_1$

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehdään Kuopion Woodi Oy:lle, jossa on tarve selvittää tehdashallien sähkönlaatua mittauksen ja laskelmien avulla. Sähkönlaatuselvitysten avulla tutkitaan verkon tila ja kartoitetaan ongelmia. Kuopion Woodi Oy:llä on alkanut esiintyä sähkönlaatu ongelmia, kun tehtaalle on asennettu muutama taajuusmuuttaja ja valaistuskuorma. Ongelmat näkyvät tehtaalle tulleissa laskuissa, joissa on ollut ylimääräisestä loistehosta johtuvaa laskua.

Opinnäytetyön alussa tutustutaan ensin sähkönlaatua määrittäviin lakiasetuksiin ja standardeihin, jotka määrittelevät raja-arvot, joissa sähkönlaadun on vähintään pysyttävä. Tämän jälkeen on sähkönlaatuun liittyvää teoriaa, jossa tarkastellaan häiriöitä, taajuutta, jännitettä, yliaaltoja, resonanssia, jännitesäröä, jännitteen epäsymmetriaa, toimitusvarmuutta ja keskeytyksiä sekä käyttötaajuuksia ylijännitteitä. Nämä teorialiedot selvittävät sähkönlaatuun vaikuttavia erityyppisiä seikkoja. Seuraavaksi käsitellään tehoihin liittyvää teoriaa, jossa tarkastellaan lähemmin pätö-, lois-, näennäis- ja särötehoa. Näiden tehojen esiintyminen ja ominaisuudet käydään läpi, jotta saadaan teoreettisesti selvitettyä tehojen ominaisuuksia. Seuraavaksi perehdytään loistehon kompensoinnin periaatteisiin ja teoriaan sekä laitteisiin.

Käytännön osuudessa esitellään tämänhetkisen verkon ominaisuuksia, jotka käsittävät muuntajan, keskuskeskukset ja kompensoinnin. Verkon ominaisuuksien perusteella tehdyt laskelmat, jotka sisältävät taajuuskohtaiset resonointilaskelmat. Laskelmista siirrytään mittauksiin, jossa kerrotaan mittaus-suunnitelmasta, mittarista ja mittauksen suorituksesta.

## 2 STANDARDIT

Sähkönlaatuvaatimukset määritellään standardissa SFS-EN 50160. Määrittelyissä otetaan huomioon esim. pien- ja keskijänniteverkon jakelujännitteiltä vaadittavat ominaisuudet. Standardi määrittää reunaehdot, mutta aina on pyrittävä vieläkin parempaan tai parhaimpaan mahdolliseen laatuun. (Alanen ja Hätönen 2006, 14.)

Sähköverkkoon liitetyt tehoelektroniikkalaitteet synnyttävät verkkoon harmonisia yliaaltoja, joista aiheutuu jännitesäröä. Standardissa määritellään harmonisen yliaallon viikon tarkastelujakson raja-arvot 10 minuutin tehollisarvoina sekä kokonaissärön raja-arvot. Määritetyt raja-arvot sallivat kuitenkin sen verran häiriöitä, että niitä lähestyttäessä käytännön verkossa alkaa esiintyä jo ongelmia. Tästä syystä verkonhaltijan kannattaa asettaa yliaalloille standardia tiukemmat rajat. Standardissa on määritelty harmonisia yliaaltoja seuraavasti: "Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtäsuuri kuin taulukossa 1 annettu arvo. Resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäiselle harmoniselle. Lisäksi jakelujännitteelle kokonaissärökertoimen, THD (mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %." (SFS-EN 50160, 18, 20.)

Epäharmonisille yliaaltokomponenteille ei ole vielä määritetty raja-arvoja. Nämä kuitenkin kasvavat koko ajan verkossa, koska taajuusmuuttajat ja näitä aaltoja tuottavat laitteet tulevat lisääntymään verkossa. (SFS-EN 50160, 18, 20.)

Teollisuuden jakeluverkossa tapahtuu koko ajan muutosilmiöitä, joita aiheuttavat laitteiden käynnistäminen ja sammuttaminen. Näiden ilmiöiden voimakkuus riippuu laitteen tai laitteiston yhteenlasketusta nimellistehosta ja oikosulkutehon suhteesta. Laitteen kytkentä- tai sammuttamistilanteessa jännitteenvaihteluille sallitut arvot ovat samat kuin luvussa 3.3 jännite. Mikäli kuitenkin laitteen kytkentä- tai sammutustilanteessa jännite ylittää nämä raja-arvot, tapahtuma luokitellaan jännitekuopaksi tai kohoumaksi. Lisäksi nopeita jännitteenmuutoksia ei saa esiintyä liian paljon.



TAULUKKO 1. SFS-EN 50160:ssä yliaaltokomponenteille määritetyt raja-arvot (SFS-EN 50160, 18, 20.)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

### 3 SÄHKÖNLAATU

Sähkönlaatua alettiin huomioida 70-luvulla, kun elektroniikkalaitteet alkoivat yleistyä. Tämä johtui siitä, että sähkönlaadulla on suuria vaikutuksia sähkölaitteiden toimintaan. Elektroniikkalaitteet on suunniteltu toimimaan tietyntyyppisissä olosuhteissa, joten ne eivät kestä liian suuria poikkeamia suunnitelluista olosuhteista. Aikaisemmin sähkönlaadulla tarkoitettiin, sitä kuinka hyvin jännitteen ja virran käyrämuoto noudattavat todenmukaista sinikäyrää. Nykyisin sähkönlaadun käsite on laajentunut tarkoittamaan toimituksen varmuutta ja keskeytymättömyyttä. Sähköllä ja sen laadulla on erittäin suuri merkitys teollisuudessa, jossa tuotantoa on paljon ja laitteet ovat lähes jatkuvasti käynnissä. Tällaisissa kohteissa sähkönlaadulta vaaditaan enemmän, koska tuotannon pysähtyminen on kallista. Tyypillisiä sähkönlaadun heikkenemistilanteita havaitaan, kun sähköverkkoon asennetaan uusia laitteita. (Männistö 2006, 9.)

Sähkönlaatustandardi on täytynyt laatia, jotta saadaan kaikki sähköntuotantoa ja sähkönsiirronverkotoimintaa tekevät yritykset pysymään tietyissä sähkönlaatuvaatimuksissa. Tämä standardi velvoittaa myös yksityisiä sähkönkäyttäjiä, koska heidän sähköverkossa käyttämänsä laitteet voivat aiheuttaa joissain tilanteissa häiriökentän omaansa ja naapureidensa sekä valtakunnanlaajuisesti sähköverkon laatuun.

Sähkönlaatuun vaikuttavat seikat pystytään jaottelemaan päätekijöihin, joita ovat sähköntuotanto, siirto ja kulutustekijät. Sähköntuotanto vaikuttaa suurimmaksi osaksi taajuuteen sekä jännitetasoon. Sähkönsiirto vaikuttaa yleisimmin verkossa esiintyviin katkoksiin. Kulutuksessa olevat laitteet vaikuttavat yliaaltoihin, jännitekuoppiin ja kohoumiin, epäsymmetriaan, välkyntään sekä jännitetasoon. Nykyisissä sähkönjakeluverkoissa sähkönlaadun merkitys on kasvanut valtavasti ja kasvu on jatkuvaa, koska nykyään sähköntoimitukselta oletetaan varmuutta.

#### 3.1 Häiriöt

Sähkönlaadussa voi ilmetä kahdenlaisia häiriöitä: galvaanisesti ja sähkömagneettisesti johtuvat häiriöt. Galvaanisesti johtuvan ilmiön mittaaminen, etsiminen ja poistaminen onnistuvat helpommin kuin sähkömagneettisesti johtuvan ilmiön.

Galvaanisia häiriöitä ovat

- maadoitusviat
- pitkittäiset ja poikittaiset transientit
- yliaaltovirrat ja jännitteet
- jännitetasonvaihtelut
- jännitekatkot
- epäsymmetria.

Sähkömagneettisia häiriöitä ovat

- jännitteiden aiheuttamat sähkökentät
- virtojen aiheuttamat magneettikentät
- radiotaajuiset häiriöt.

### 3.2 Taajuus

Taajuudella tarkoitetaan sähköverkon jännitteenvaihtelunopeutta. Sähköverkon taajuuden laskennassa tarkastellaan jännitejaksoiden lukumäärää sekunteina. Jännitejaksolla tarkoitetaan sitä, että verkon jännite muuttuu säännöllisesti, joten sama jännitekuvio on toistunut uudelleen. Jännitekuvio koostuu pääosin jaksosta. Taajuuden yksikkö on Hertsi (kaava 1.)

$$Hz = \frac{1}{s} \quad (1.)$$

Taajuuteen vaikuttaa pääsääntöisesti sähköä tuottavan generaattorin pyörimisnopeus. Tämä pyörimisnopeus tulee suoraan verrannollisesti voimakoneen pyörimisnopeudesta. Taajuus kuitenkin muuttuu, jos sähköä tuottavan generaattorin ja kulutuksen tehotasapaino muuttuu eli jos generaattorin tuottama teho on eri suuri kuin kulutuksessa kuluva teho. (Moilanen 2013.)

Standardissa SFS-EN 50160 määritellään taajuudelle tietyt rajat, joissa sen tulee pysyä. Taajuudelle on määritelty kolme laatutasoa: standardilaatu, normaalilaatu ja korkea laatu. Taajuuden mittauksessa tulee käyttää 1 viikon mittausaikaa ja 10 s:n keskiarvostamisaikaa (keskeytyksiä ei lueta mukaan). Laatutasojen taajuuden raja-arvot ovat seuraavanlaiset (Viitala 2006.):

Standardilaatu:

50 Hz ± 1 % on 99,5 % vuodesta (eli 49,5 - 50,5 Hz) ja

50 Hz + 4 % /- 6 % on 100 % ajasta (eli 47 - 52 Hz).

Normaali laatu:

50 Hz ± 1 % on 100 % ajasta (eli 49,5 - 50,5 Hz).

Korkea laatu:

50 Hz ± 0,5 % on 100 % ajasta (eli 49,75 - 50,25 Hz).

### 3.3 Jännite

Jännitteen tehollisarvoa ilmaistaan jännitetasoilla. Jännitetasoille on määritelty standardissa SFS-EN 50160 tietyt rajat ja vaihtelevuus, joiden mukaan jännite muuttuu. Jännitteen raja-arvot pienjänniteverkoissa:

Mittausaika: Viikko, 10 min jaksoissa (keskeytyksiä ei lueta mukaan).

Standardi laatu: 95 % tehollisarvojen 10 min keskiarvoista välillä 207... 253 V ja 100 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista välillä 195,5...253 V.

Normaali laatu: Tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvot ovat välillä 207... 244 V.

Korkea laatu: Tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvot ovat välillä 220... 240 V ja 10 minuutin arvojen keskiarvo 225...235 V. (Viitala, 2006.)

Standardissa SFS EN 50160, jännitteenvaihtelulle on määritelty tietyt rajat, joissa sen tulisi pysyä. Jännite voi vaihdella rajojen sisäpuolella vapaasti, mutta jos kuitenkin ei pysytä rajojen sisällä vaan jännite nousee tai laskee ylijänteiden, on kysymys jännitekohoumista ja jännitekuopista. Jännitekohoumassa jännite nousee ja jännitekuopassa jännite laskee yli sallitun arvon.

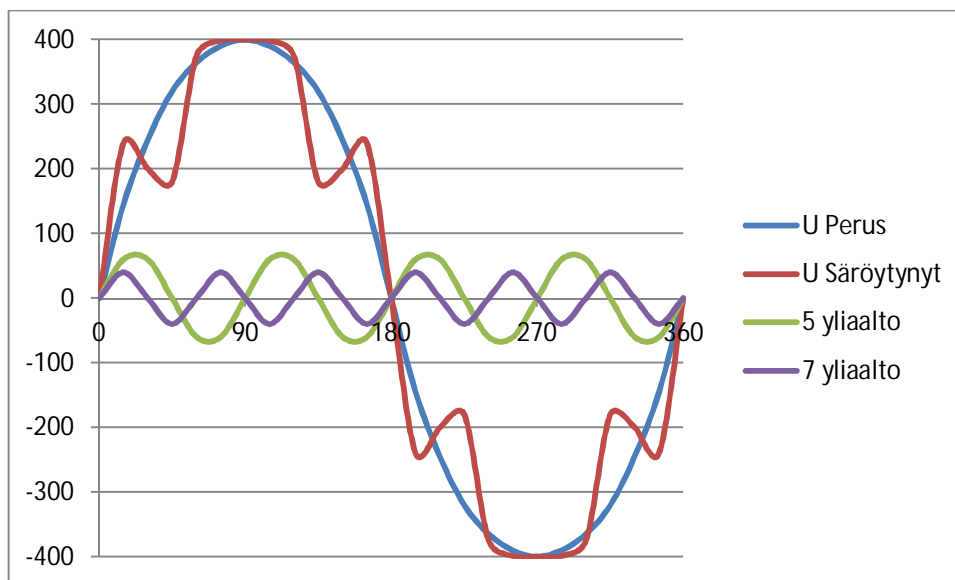
Jännitteen kohoumiin on syynä vaihejohtimien tai vaihejohtimen ja maan väliset tilapäiset ylijännitteet. Ylijännitteitä aiheuttaa jakeluverkon tai liittymän sähkölaitteiston vika tai kytkentätoimenpide kuten

- kuorman nopea alenema
- loistehon ylikompensointi
- yksivaihevika
- vaiheiden epätasainen kuormittaminen.

Jännitekuopat aiheutuvat yleisimmin jakeluverkon tai rakennuksen laitteiden kytkennöistä tai yleisessä jakeluverkossa tapahtuvista vioista. Kuoppien aiheuttajia ovat suuritehoisten laitteiden kytkennät. Tällaisia laitteita ovat mm. muuntajat, suuritehoiset sähkömoottorit, hitsauslaitteet, hissit, nosturit, lämmittimet sekä loistehonkompensointi. (Viitala 2006.)

### 3.4 Yliaallot

Yliaalloiksi kutsutaan perustaajuuden eli 50 Hz:n yllittäviä jännitteitä ja virtoja. Yliaaltoja muodostuu nykyisten tehoelektronikkalaitteiden sivutuotteena. Ideaalitulassa olevassa sähköjakeluverkossa jännitteet ja virrat ovat sinimuotoisia. Komponenttien epäsymmetrisyys ja epäsymmetriset kuormat rikkovat verkon ideaalitulannetta. Ne aiheuttavat yliaaltojen summautumisen perustaajuiseen siniaaltoon, joka aiheuttaa siniaallon säröytymisen. Tämä säröytyminen on esitetty kuvassa 1. Kuvassa näkyy sinisellä normaalitulanteessa oleva jännitteen siniaalto. Säröytynyt jänniteaalto on merkitty punaisella. Kuvaan on merkitty myös säröytymistä aiheuttavat 5. harmoninen yliaalto vihreällä ja 7. harmoninen yliaalto violetilla.



KUVA 1. Yliaaltojen summautuminen perustaajuiseen siniaaltoon. (Haataja 2015-5-15.)

Yliaaltopitoisuuden eri määrät vaikuttavat eri tavoin siniaaltoon. Yliaallot eivät läheskään aina käytäydy säännönmukaisesti eli aaltomuoto ei tahdo pysyä samanlaisena jaksosta toiseen. Suuri yliaaltojen vaihtelu tekee vaikeammaksi niiden suodatuksen kuin niiden pieni vaihtelu. Nykyisillä aktiivisuudattimilla pystytään suuretkin yliaaltojen vaihtelut suodattamaan. Yliaallot jaetaan kahteen ryhmään harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoniset ovat perusaallon (50 Hz) moninkertoja ja epäharmoniset niistä poikkeavia taajuuksia. Lisäksi harmoniset yliaallot ovat yleisempiä sähköverkoissa kuin epäharmoniset yliaallot. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07.)

#### 3.4.1 Harmoniset yliaallot

Elektroniikkalaitteet, erityisesti niiden hakkuriteholähteet, ottavat virtaa siniaallosta vain osan puolijakson ajasta. Nämä laitteet synnyttävät sähköverkkoon harmonisia parittomia yliaaltovirtoja eli 50 Hz moninkertoja: 3. (150 Hz), 5. (250 Hz), 7. (350 Hz) jne. Näitä virtoja nimitetään epälineaarisiksi virraksi eli harmonisiksi yliaaltovirroiksi. Harmoninen yliaaltovirta synnyttää verkon impedansseissa harmonisia yliaaltojännitteitä, joiden summaa kutsutaan kokonaisjännitesäröksi THD (Total Harmonic Distortion). Yliaallot aiheuttavat toimintahäiriöitä, laitevikoja ja rikkoja. Harmoniset yliaallot aiheuttavat erityisesti elektroniikkalaitteille itselleen, mutta myös muille mm. seuraavanlaisia ongelmia:

- elektroniikka-, tele- automaatio- ja tietoliikennelaitteiden toimintahäiriöitä ja laitevikoja
- johdonsuojakatkaisijoiden ja vastaavien suojalaitteiden laukeamisia
- ohjaus- ja mittaussignaalien vääristymiä
- kompensointikondensaattoreiden tuhoutumisia
- ylimääräisiä teho- ja jännitehäviöitä kaapeleissa, muuntajissa, moottoreissa ja generaattoreissa
- tärinää ja ääni-ilmiötä.

- Parittomat ja kolmella jaolliset yliaallot (3., 9., 15., 21. jne.) ylikuormittavat nollajohtimia; nollajohtimen yliaaltovirrat lisäävät sähköverkon jännite- ja tehohäviöitä, sähkö- ja magneettikenttiä sekä nollajohtimien kuumenemisiä
- muuntajille ja moottoreille lisälämpenemisiä ja vaurioita
- moottoreille epätahtimomentteja, joista seuraa mekaanisia rasituksia moottoreiden laakereille ja rakenteille. (Viitala, 2006.)

### 3.4.2 Epäharmoniset yliaallot

Epäharmoniset yliaallot vaikuttavat jännitteeseen ja virtaan aiheuttamalla niiden käyrämuotojen jaksoihin epäsymmetriaa. Tästä voi seurata resonointia, välkyntää ja häviöiden kasvua.

## 3.5 Resonanssi

Vaihtosähköpiirissä energiaa vaihtuu jatkuvasti kapasitanssin ja induktanssin välillä. Kun kapasitanssista purkautuu energiaa tietyn neljännesjakson aikana, niin osa siitä varautuu induktanssiin ja toisen neljännesjakson aikana tapahtuu päinvastoin eli induktanssi purkautuu ja osa sen purkautumisesta varautuu kapasitanssiin. Induktanssin ja kapasitanssin jännitteen ja virran suhteet riippuvat kumpikin taajuudesta, mutta ne ovat eri suuntiin. Tästä ilmiöstä johtuu että siirtyvän energian suhde koko varautuvaan energiaan on taajuudesta riippuvainen. Sopivilla taajuuksilla siis koko varautunut energia siirtyy edellä mainituilla tavoilla, kun näin alkaa tapahtua sanotaan piirin olevan resonanssissa. Resonanssille ominaista on sellainen piirre, että ulkoapäin tarkkailtaessa tilannetta näyttää se siltä, kuin kapasitanssi ja induktanssi kumoaisivat toisensa ja jäljellä olisi vain resistanssin vaikutus, josta seuraa virran ja jännitteen kasvu. Edellä mainittujen ominaisuuksien ansiosta yliaaltoihin liittyvistä verkkoon vaikuttavista häiriöilmiöistä ongelmallisimman on resonanssi. Resonanssi on jaettu sarja- ja rinnakkaisresonanssiin. (Voipio 2006, 190.)

### 3.5.1 Sarjaresonanssi

Sarjaresonanssi syntyy, kun syöttävän verkon suunnasta kuluttajan verkkoon kulkeutuu yliaaltoja, jotka resonoivat syöttö- tai mittamuuntajan ja kuluttajan verkkoon liitettyjen kapasitanssien välillä. Sellaisessa piirissä, jossa sarjaresonanssi-ilmiötä tapahtuu, voidaan se laskemalla todentaa. Kaavassa 2 esitetään verkon induktanssin  $L$  ja kapasitanssin  $C$  sekä resistanssin  $R$  arvojen perusteella verkon värähtelyä. Kun kaavan 2 lausekkeen tulos on huomattavasti suurempi kuin piirin resistanssi, niin silloin piirissä esiintyy värähtelyä. Siinä tapauksessa kun laskennan tulos on edellä mainitun mukainen niin siitä seuraa, että kapasitanssin ja induktanssin jännitteet ovat suurempia, kuin piiriä syöttävän jännitelähteen jännite. Tästä syystä sarjaresonanssia kutsutaan myös jänniteresonanssiksi. Lisäksi induktanssiin ja kapasitanssiin varautuneiden energioiden maksimimäärät ovat yhtäsuuret. Sarjaresonanssi on teollisuuden sähköjako- ja jakeluverkoissa harvinaisempi kuin rinnakkaisresonanssi. (Voipio 2006, 193.)

$$\sqrt{\frac{L}{C}} \gg R \quad (2)$$

Sarjaresonanssin kulmataajuus  $\omega_r$  ja edelleen resonanssi taajuus  $f_r$  laskenta (kaava 3 ja 4.)

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (3)$$

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (4)$$

### 3.5.2 Rinnakkaisresonanssi

Rinnakkaisresonanssin syntyminen tapahtuu, kun jokin verkkoon liitetyistä yliaaltolähteistä on syötänyt verkkoon yliaaltoa, jonka jälkeen nämä jäävät resonoimaan samaan verkkoon liitetyn kapasitanssin ja syöttömuuntajan sekä muiden induktanssien välille. Sellaisessa piirissä, jossa tätä ilmiötä on selvästi esiintyvissä, kapasitanssin ja induktanssin virrat ovat huomattavasti suurempia kuin piirin normaalitilassa ottama virta. Rinnakkaisresonanssia kutsutaankin siitä syystä virtaresonanssiksi, joka on teollisuusverkoissa yleisin resonanssitilanne. Kun käytössä on rinnakkaiskompensointi ja esiintyy resonointia, jonka resonanssi taajuus  $f_r$  on laskettavissa (kaava 5.) Kaavalla lasketaan verkon oikosulkutehon  $S_k$  ja kompensointikapasitanssin  $Q_c$  arvojen perusteella verkon resonanssi taajuus  $f_r$ . (Voipio 2006, 198.)

$$f_r = f_1 * \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (5)$$

### 3.6 Jännitesäro

Jännitteen käyrämuodon säröytyminen tapahtuu, kun verkossa esiintyy yliaaltojännitteitä. Jännitesärokertoimella THD(U) kuvataan säröytymisen suuruutta. Jännitesärokerroin ilmaisee jännitteessä olevien yliaaltojännitteiden määrää. Yliaaltojännitteiden vaikutus ei näy suoraan perusaallon jännitteessä vaan kyse on neliöllisestä tai geometrisesta summasta. (Männistö 2006, 21.)

Jännitteen säröytymisen tarkasteluun on hyvä käyttää kokonaissäröä. Kokonaissärön ilmoittamisessa käytetään pääsääntöisesti prosenttiarvoa perusaallosta, koska suhteellisten arvojen tulkitseminen ja vertaaminen standardeihin ja olemassa oleviin mittaustuloksiin on helpompaa. Prosenttiarvoina ilmoittamisessa on myös se hyvä puoli, että se ei ole riippuvainen absoluuttisista arvoista. Kokonaissäröprosentin pystyy mittaamaan tai laskemaan. Lisäksi molemmilla tavoilla pystytään myös tarkastelemaan yksittäisten yliaaltotaajuuksien suuruuksia erikseen.

### 3.7 Jännitteen epäsymmetria

Sähköverkon jännitteessä voi esiintyä useita epäsymmetrisyystekijöitä. Näitä tekijöitä ovat mm vino-kuorma, nollajohtimen ylijännitteet sekä transienttiylijännitteet.

Vinokuormituksessa laitteistojen kuormitus on jakautunut epätasaisesti eri vaiheiden välille. Tästä vaiheiden välisestä epäsymmetrisyydestä johtuen nollajohtimessa alkaa kulkea virtaa. Ideaalitalanteessa kolmivaihejärjestelmä on kuormitettu symmetrisesti. Ideaalitalanteessa kuorma on jakautunut tasaisesti kaikille vaiheille, jolloin nollajohtimessa ei kulje virtaa. Tasaisesti jaetuilla lineaarisilla kuormilla, kuten vastuksilla ja käämeillä tämä ideaalitalanne on mahdollinen. Vinokuormalle on annettu vinokuormitussuositus, joka määrittää vaiheiden keskenäisen poikkeaman suuruuden prosentteina. Suositus määrittelee vaiheiden keskenäisen poikkeaman olevan  $\pm 10\%$ . Tällä tarkoitetaan sitä, että kunkin vaiheen on oltava 10 % sisällä vaihevirtojen keskiarvosta. Vinokuorma muodostuu helposti, koska L1-vaiheen johdonsuojakatkaisijat ja sulakkeet ovat ensimmäisinä sekä niihin myös laitteet ensimmäisinä kytketään. Jakamalla kuormat tasaisesti vaiheiden kesken vältetään tältä vino-kuormalta, joka aiheuttaa nollajohtimen virran ja vaiheiden välisen jännite-eron.

Jännitteen epäsymmetriaherkissä paikoissa nollajohtimet tulee mitoittaa yhtä suuriksi, kuin vaihejohtimien poikkipinta-alat.

### 3.8 Transienttiylijännite

Transientti-ylijännite on sähköverkon muutosilmiö, joka on yleensä jännitepiikki. Tämä on värähtelevä tai ei-värähtelevä ylijännite, jolla on nopea nousuaika. Transienttiylijännitteen nopeus voi vaihdella 0,3  $\mu\text{s}$ ...5 ms, kestäen n. 0...5 ms ja vaimeten lopuksi nopeasti. Tämä voi esiintyä vaiheen- ja nollajohtimen välissä tai vaiheiden kesken. Transienttiylijännitteestä voi aiheutua transienttiylivirta, jos pienen induktanssin virta katkaistaan, mutta ison induktanssin (moottorit, muuntajat, kuristimet) virta katkaisussa ei synny virran muutosta. Induktanssin jännitehän pyrkii estämään virran muutoksen. Vastaavasti, kun kapasitanssiin (kompensointi tai taajuusmuuttaja) kytketään jännite, se pyrkii estämään jännitteen muutoksen suurella virralla. Kytkeätilanteissa on siis kaksi pääasiallista transienttimallia:

- Induktiivisen kuorman katkaisusta syntyvät jännitepiikit
- Kapasitiivisen kuorman päälle kytkennässä syntyvät virtapiikit.

Kun syntyy ylivirtaa, niin syntyy myös häviöitä. Transienttiylijännitteitä aiheuttavat yleensä:

- sähkölaitteiden kytkennät päälle tai pois (erityisesti suuritehoiset muuntajat, moottorit, loisteonkompensointikondensaattorit ja katkaisijat)
- sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden toimimiset
- salamaniskut suoraan johtoihin ja laitteisiin, joita maakaapelit vaimentavat vain osittain
- salamaniskut johtojen lähelle
- staattisen sähköön purkautumiset.
- maasulku



Transientti- ja muut ylijännitteet aiheuttavat läpilyöntejä etenkin laitteiden elektronisissa komponenteissa ja eristeisessä tehden tällä tapaa laitteistoja toimintakyvyttömäksi. (Viitala 2006.)

### 3.9 Toimitusvarmuus ja keskeytykset

Sähkönjakelussa keskeytys katsotaan tapahtuvan kun liittymiskohdan jännite putoaa alle 1 %  $U_n$  (230 V 0...2,3 V). Sähkönjakelun keskeytykset on jaoteltu suunniteltuihin ja häiriökeskeytyksiin. Suunnitellut keskeytykset ovat jakeluverkon korjaus- ja rakentamistöitä, ja niistä ilmoitetaan etukäteen sähkönkäyttäjille. Häiriökeskeytykset ovat satunnaisia tapahtumia, joita ei voi ennustaa. Nämä aiheutuvat pysyvistä tai ohimenevistä vioista ja liittyvät enimmäkseen ulkopuolisiin tapahtumiin, laitevikoihin tai häiriöihin. Häiriökeskeytyksen aiheuttajia ovat: (Viitala 2006.)

- ilmastolliset ylijännitteet
- myrskyt
- laiteviat ja laitteiden toimintahäiriöt
- laitteiden ja kaapeleiden rakenne- ja materiaaivirheet
- ulkopuoliset tekijät kuten maankaivutyöt ja eläimet.

Häiriökeskeytykset luokitellaan ohimenevän vian aiheuttamiin ja kestoltaan alle 3 min:n lyhyihin ja pysyvän vian aiheuttamiin ja kestoltaan yli 3 min:n pitkiin keskeytyksiin (Viitala 2006).

### 3.10 Käyttöraajaiset ylijännitteet

Käyttöraajaiset ylijännitteet johtuvat monesti nopeista kuorman pois tippumisista, maasuluista tai ylikompensoinnista. Jännitteen nousua aiheuttaa myös vaiheiden epätasainen kuormitus. (Viitala 2006.)

## 4 SÄHKÖVERKON TEHOT

Sähkömoottorit, kuristimet ja muuntimet, joissa on sisällä käämejä eli induktanssia, kuluttavat sähköistä energiaa eli tehoa. Sähköverkosta hyödyksi saatava teho riippuu hyvin paljon siitä, ovatko jännite- ja virta-aalto samanvaiheisia eli kulkevatko ne yhtä matkaa vai onko niissä vaihe-eroa eli tietynlaista viivettä. Mikäli jännite ja virta ovat samanvaiheisia, saadaan niistä koko teho hyödyksi. Virran ja jännitteen vaihe-eron ollessa  $90^\circ$  ei tehoa saada hyödyksi ollenkaan.

### 4.1 Pätöteho

Pätöteho on laitteen resistanssissa kuluva teho. Pätöteho ilmaisee sähköenergian muutoksen määrää työsuorituksiksi eli esimerkiksi lämpöenergiaksi. Pätöteho muuttaa siis muotoaan. Verkon kuorman ollessa kokonaan resistiivistä, eli esimerkiksi lämmitystä tai hehkulamppuvalaistusta, jännite ja virta ovat samansuuntaisia eli ei ole vaihe-eroa ja koko teho saadaan hyödyksi. Pätötehon määrän määrittää generaattorin voimakoneen teho. Voimakone tuottaa mekaanista tehoa, jonka generaattori muuttaa pätötehoksi. Tämä pätöteho muuttuu tilanteen ja käyttökohteen mukaan joksikin muuksi energiamuodoksi. Pätötehon suure on  $P$ .

### 4.2 Loisteho

Loistehoa tarvitaan käämin magneetoimiseen eli magneettikentän tuottamiseen ja tätä kautta laitteet tarvitsevat loistehoa toimiakseen. Loisteho eroaa pätötehosta, siten ettei se tee mekaanista työtä. Loisteho on varautunutta energiaa käytännössä joko induktanssin magneettikenttään tai kapasitanssin sähkökenttään. Tämä loisteho vuoron perään latautuu ja purkautuu.

Loistehoa on siis induktiivista ja kapasitiivista. Määräytyminen tapahtuu sen mukaan, onko virta edellä vai jäljessä jännitettä. Virran ollessa edellä jännitteestä eli virran huippuarvon ollessa ennen jännitteen huippua loisteho on kapasitiivista. Virran ollessa jäljessä jännitteestä eli jännitteen huippuarvon ollessa ennen virran huippua loisteho on induktiivista. Määritykset johtuvat ominaisuuksista, eli induktiivinen loisteho on seurausta kuormasta, joka sisällöltään on enimmäkseen induktanssia eli käämiä. Kapasitiivinen loisteho on seurausta kuormasta, joka on sisällöltään enimmäkseen kapasitanssia eli kondensaattoreita.

Loisteho on tarpeen, mutta on siinä haittojakin. Haitat johtuvat loistehon synnyttämän virran ja jännitteen välisestä vaihe-erosta. Niin kuin edellä on mainittu, aiheuttaa vaihe-ero kokonaistehon vähenemistä. Tämä tarkoittaa sitä, että teho pysyy vakiona ja vaihe-ero kasvaa, myös virran täytyy kasvaa. Tästä virran kasvusta aiheutuu ongelmia hyvin äkkiä. Loistehon suure on  $Q$ .

### 4.3 Näennäisteho

Näennäisteho kertoo sähköverkon kokonaistehon eli sen tehon voi saavuttaa tietyllä jännitteellä ja virralla. Tämän voi selittää myös niin, että kyseessä on verkon tai laitteen siirtokapasiteettia kuvaava teho. Tämä teho sisältää pätö- ja loistehon.

Pääasiassa, kun virta ja jännite ovat erivaiheisia, jää osa tehosta hyödyntämättä, koska se liikkuu edestakaisin sähköverkon ja kuorman välillä. Tästä syystä se ei vaihda pois sähköisestä muodostaan. Oikeasti on olemassa vain yhdenmukaista tehoa eli jännitteen hetkellisarvo ja virran hetkellisarvo kerrottuna keskenään. Muut tehotyypit ovat vain laskennan apuna. Laskennassa näitä erotteluja tarvitaan, koska halutaan jaotella tehot eri komponenteiksi hyödynnettävään - ja ei hyödynnettävään energiaan. Näennäistehon suure on  $S$ .

### 4.4 Säröteho

Perustaajuisella siniaallolla vaihtosähköiset tehosuureet ovat pätöteho, loisteho ja näistä kahdesta muodostuva näennäisteho. Yliaaltoteoriaa sovellettaessa lisäksi tarvitaan kuitenkin ns. säröteho, joka tulee yliaaltojen aiheuttamasta loistehosta ja se on loistehoa. Perustaajuisen loistehon tapaan säröteho ei tee työtä. Särötehosta esiintyy harmonisia yliaaltotaajuuksia, jotka poikkeavat huomattavasti perusaallosta. Särötehon kompensointia ei pystytä toteuttamaan perustaajuuden kompensointilaitteistolla. Kaavassa 6 on määritelty säröteho. (Ruppa 2001.)

$$D = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2} \quad (6)$$

jossa

- $D$  = säröteho
- $S$  = kokonaisnäennäisteho
- $P_1$  = perustaajuinen pätöteho
- $Q_1$  = perustaajuinen loisteho.

## 5 LOISTEHON KOMPENSOINTI

Loistehon kompensoinnin tarkoituksena on pystyä rajaamaan loistehon kulkureittiä, jotta sähköjake-luverkossa häviöt saataisiin jäämään mahdollisimman vähäisiksi. Sähköverkossa loistehon siirto pit-kiä matkoja ei ole järkevää, koska loisteho vähentää energiansiirtokapasiteettia. Lisäksi loisteho, jota laitteet tarvitsevat toimiakseen, voidaan tuottaa lähellä näitä laitteita.

Loistehon vaikutus jännitteeseen on myös huomattava seikka, joka pitää ottaa huomioon kompen-soinnin yhteydessä, sillä induktiivinen loisteho laskee jännitettä ja kapasitiivinen loisteho nostaa jän-nitettä. Sähköverkossa yleensä esiintyvä loisteho on induktiivista eli loistehoa "kulutetaan". Kun lois-teho on induktiivista, eli sitä kulutetaan, kompensointi toteutetaan kapasitanssien eli kondensaatto-reiden avulla. Loistehon mennessä kapasitiiviseksi on verkossa kapasitanssia enemmän kuin sen ku-lutusta eli induktanssia. Tämä on harvinainen ilmiö ilmajohtolisissa sähköjakeluverkoissa, koska ne itsessään jo ovat induktiivista kuormaa. Tilanne tulee kuitenkin toisenlaiseksi, jos sähköjakeluverk-ko muodostuu suurimmaksi osaksi maakaapeleista ja nimenomaan pitkistä maakaapeleista. Kapasi-tiivinen tilanne johtuu maakaapelin rakenteesta, jossa vaiheet ja nolla ovat hyvin lähellä toisiaan ja ne ovat niin samansuuntaisesti. Tämän takia johtimien välille syntyy kapasitanssia, joka voi olla suu-rempi kuin induktiivinen osuus, mistä johtuu kapasitiivinen verkko. Mahdollisuus kapasitiivisen ver-kon ilmenemiseen on myös, kun jonkun kuluttajan loistehon kompensointilaitteiston säätö on väärin, minkä vuoksi kompensointi tuottaa enemmän loistehoa kuin tarvitsisi. Loistehon ollessa kapasitiivista jännite nousee muuntajilla ja generaattoreilla, koska se pyrkii magnetoimaan niitä lisää.

Loistehon ollessa kapasitiivista voidaan kompensointi hoitaa keloilla tai pienentämällä generaattorei-den magnetointia. Tällaisessa tilanteessa generaattori ottaa puuttuvan osan magnetointitehostaan verkossa olevasta loistehosta. Alimagnetoidun generaattorin huono puoli on se, ettei saada täyttä pätötehon määrää, joka saataisiin normaalimagnetoinnilla. (Männistö. 2006.)

Kompensointiin on syynä standardin sähkönlaadulle määrittämät vaatimukset ja sen avulla verkko-yhtiöt ovat määrittäneet omat vaatimuksensa kompensoinnista ja loistehon otosta ja syötöstä säh-könjakeluverkkoon. Näillä vaatimuksilla on toinenkin määrittävä asia: taloudellinen vaikutus. Ylimää-räinen loisteho verkossa kuormittaa verkkoa enemmän ja verkon rakenne tarvitsee ylivoimista. Tä-hän tarpeeseen vaikuttaa lisäkuorman määrä. Loisteholle verkkoyhtiöt määrittävät rajat yleisesti prosentteina liittymän pätötehohuipusta.

### 5.1 Kompensoinnin periaatteet

Kompensoinnin toteuttamiseen voidaan käyttää useampia tapoja, kuten kompensointi keskitetysti keskuksien läheisyyteen, tietyn laiteryhmän läheisyyteen tai kunkin laitteen läheisyyteen. Yleinen ratkaisu kompensoinnille on keskittää se keskuksien läheisyyteen, jolloin se kompensoi kaikkien lait-teiden välillä olevaa loistehoa. Tässä on se huonompi puoli verrattuna laitekohtaiseen kompensoin-tiin, että loisteho joutuu kulkemaan pitemmän matkan ja näin ollen kuormittaa verkkoa enemmän.

Tämä matkasta johtuva lisäkuormitus on paikallinen ilmiö, joka on helppo huomioida suunnitteluvaiheessa, niin että siitä ei aiheudu ongelmia.

#### 5.1.1 Keskitetty kompensointi

Keskitetyssä kompensoinnissa muodostavat kaikki verkon laitteet ryhmän, jota kompensoidaan säätyvällä kompensointiyksiköllä. Tämä yksikkö sisältää useita komponentteja, joiden toimintaa ohjataan automaattisesti kuormalta tulevan loistehotiedon mukaisesti. Tämänäyttöinen kompensointiyksikkö asennetaan pääkeskuksen lähtöön ja varustetaan sulakkeilla. Tämänäyttöinen kompensointi on huomattavan kookas, mikä täytyy ottaa suunnittelussa huomioon. Nykyisillä estokelaparistoilla pystytään estämään yli- ja alikompensointi esim. jos verkossa esiintyy yliaaltoja. Tämä on yleisin tapa tehdä kompensointi. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07.)

#### 5.1.2 Laiteryhmän kompensointi

Laiteryhmän kompensoinnissa on laitteista muodostettu ryhmä, joka vaatii tietynsuuruisen kompensointiyksikön. Tämä yksikkö kompensoi vain tätä tiettyä laiteryhää, joten se on asennettava mahdollisimman lähelle kompensoitavia laitteita. Tälle laiteryhän kompensoinnin kannattavuudelle on edellytyksenä, että loistehon vaihtelu on vähäistä ja laitteiden väliset etäisyydet lyhyitä. Tämänäyttöisessä kompensoinnissa käytetään kiinteää kompensointiyksikköä eli tietynkokoista estokelaparistoa tai pelkkää kondensaattoria. Nämä yksiköt on varustettava kytkimellä ja sulakkeilla. Yleensä tätä kompensointitapaa käytetään valaistuksessa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07.)

#### 5.1.3 Yksittäinen laitteen kompensointi

Yksittäisen laitteen kompensoinnissa kompensoitavalle laitteelle sijoitetaan oma kompensointiyksikkönsä. Yksikkö kompensoi vain tätä tiettyä laitetta, joten se on asennettava mahdollisimman lähelle kompensoitavaa laitetta. Yksittäisen laitteen kompensoinnin kannattavuuden edellytyksenä on, että loistehon vaihtelu on vähäistä. Tämä kompensointitapa helpottaa kompensoinnin säätöä siinä määrin, ettei sitä tarvitse huomioida, koska kompensointi on samaan aikaan toiminnassa kuin itse laitekin. Yksittäisten laitteiden kompensoinnin käyttökohteena ovat yleisesti sähkömoottorit tai joskus myös suuritehoiset purkauslamput. Tämänäyttöisessä kompensoinnissa käytetään kiinteää kompensointiyksikköä eli tietynkokoista estokelaparistoa tai pelkkää kondensaattoria. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07.)

### 5.2 Kompensointilaitteita

Kompensoinnin laitevalintoihin vaikuttavat kuormituksen vaihtelevuus, taloudellisuus ja haluttu lopputulos. Kompensoinnin suunnittelussa on hyvä ottaa huomioon myös laitteistojen laajennustarpeet sekä verkon yliaaltopitoisuus. Kompensointilaitteistoilla pyritään vaikuttamaan tehojakaumaan pätö- ja loistehojen välillä, jotta se pysyisi sähköyhtiön määräämissä arvoissa. Jos kuitenkin pätö- ja loistehon suhde muuttuu liikaa, alkaa verkkoyhtiö laskuttaa asiakasta ylimääräisestä loistehosta.

Kompensointilaitteita on monenlaisia, kuten aktiivisia ja passiivisia. Passiiviset kompensointilaitteet toimivat siten, että ne säätelevät tehojakaumaa pelkästään kytkemällä kiinteitä kondensaattori- ja induktanssiportaita päälle tai pois. Aktiiviset kompensointilaitteet toimivat siten, että ne säätelevät tehojakaumaa olemalla aktiivisia koko ajan ja säätymällä portaattomasti. Aktiivikompensoinnin hyvä puoli on se, että yleensä saadaan samaan aikaan korjattua muitakin ongelmia, kuten jännitetasoa, epäsymmetriaa ja yliaaltoja. (Korpinen, Mikkola, Keikko, Falck 2008, 32.)

## 6 SÄHKÖVERKON OMINAISUUDET

Kuopion Woodi Oy:ssä on 80-luvulla rakennettu verkko, jota on osin muutettu ja uusittu jälkeenpäin. Kohteen sähköverkon ominaisuuksien selvittämiseksi otettiin yhteyttä Savon Voimaan ja selvitettiin muuntajankilpiarvot sekä kulutusmittarin tiedot.

### 6.1 Muuntaja

Kuopion Woodi Oy:n tehtaita syöttää Savon Voiman omistuksessa oleva pylväsmuuntaja, joka on teholtaan 315 kVA ja muuntosuhteeltaan 20 kV/400 V. Muuntajasta saadut kilpiarvot on esitetty taulukossa 2. Taulukosta ilmenevät valmistaja, valmistusvuosi, näennäisteho, ensiö- ja toisiojännite, kuormitushäviöt, tyhjäkäyntihäviöt, kytkentäryhmä, oikosulkuimpedanssi sekä oikosulkuresistanssi. Kuvassa 2 on Kuopion Woodi Oy:n tehtaita syöttävä muuntaja.

TAULUKKO 2. Muuntajankilpiarvot

Valm.	Strömberg	P0	460 W
Valm.vuosi	1989	PK	3690 W
SN	315 kVA	Kytk. Ryhmä	Dyn 11
Ensiöjännite	20 kV	Zk (%)	5,00 %
Toisiojännite	0,4 kV	Rk (%)	1,17 %





KUVA 2. Syöttömuuntaja (Haataja 2015-4-22.)



## 6.2 Keskukset

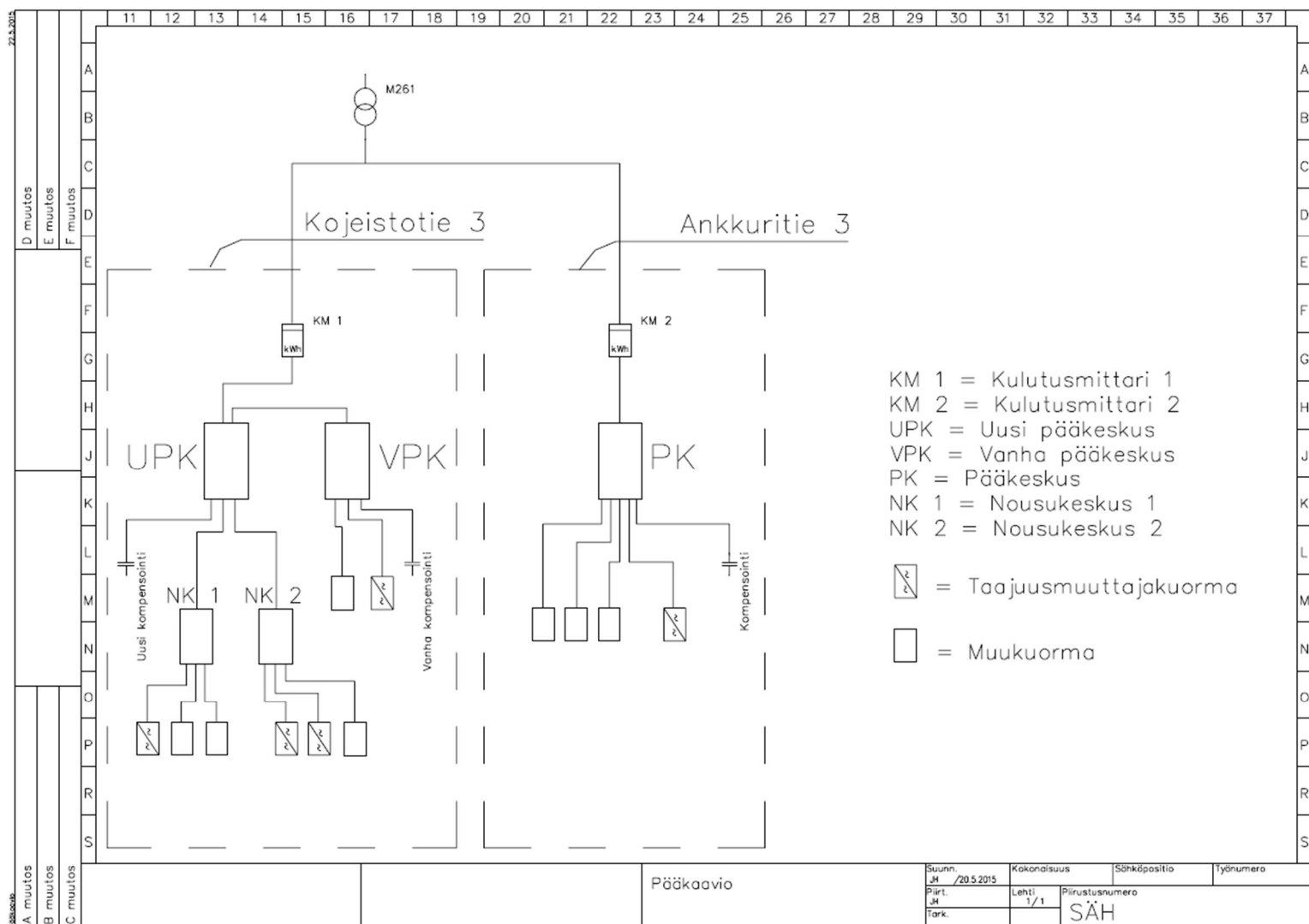
Tehtaalla on kaksi pääkeskusta, jotka kumpikin syöttävät omaa tehdashalliaan. Pääkeskuksilta syöttö menee pienemmille keskuksille ja osittain suoraan kulutuslaitteille.

## 6.3 Kompensointi

Molemmilla pääkeskuksilla on omat keskitetyt kompensointijärjestelmänsä, jotka ovat 50 kVar tehoisia. Uuden pääkeskuksen kompensointi on esitetty kuvissa 3 ja 4.



KUVA 3. Uuden pääkeskuksen kompensointi ulkoa (Haataja 2015-5-21.) KUVA 4. Uuden pääkeskuksen kompensoinnin sisältö (Haataja 2015-5-21.)



KUVA 5. Periaatekaavio. (Haataja 2015-5-20.)

Kuvassa 5 on esitetty periaatekaaviokuva verkosta. Siinä näkyy syöttävä muuntaja (M261). Kuvassa on molemmat tehdasrakennukset eroteltu katkoviivalla, joissa kummassakin on omakulutusmittaus. Tämän jälkeen on pääkeskustaso, jossa Kojeistotiellä on uusi pääkeskus ja vanha pääkeskus ja Ankkurititiellä on yksi pääkeskus. Näihin on kytketty keskuskohtaiset kompensoinnit ilman estokelaa. Kuvasta nähdään myös, että verkossa on kaksi nousukeskusta sekä erityyppisiä kuormia.

## 7 LASKELMAT

Laskemalla voidaan tutkia tehtaan jakeluverkon ominaisuuksia ja esiintyviä yliaaltoja, jotta tarvittavat laskelmat voidaan toteuttaa, tarvitaan tehdasta syöttävästä muuntajasta tietoja ja tarvitaan tehtaalla olevan kompensointijärjestelmän tiedot sekä kompensointitaso.

Lasketaan muuntajan virta  $I_n$  (kaava 7.) Kaavassa lasketaan muuntajasta saatujen näennäistehon  $S_n$  ja toisiojännitteen  $U_{2n}$  perusteella virtaa.

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}} = \frac{315 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 454,7 \text{ A} \quad (7)$$

Virran jälkeen lasketaan muuntajan impedanssi  $Z_k$  (kaava 8.) Kaavassa lasketaan muuntajasta saatujen oikosulkuimpedanssi  $Z_k$  % ja toisiojännitteen  $U_n$  sekä näennäistehon  $S_n$  perusteella impedanssia.

$$Z_k = \frac{Z_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{5}{100} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{315 \text{ kVA}} = 25,4 \text{ m}\Omega \quad (8)$$

Kun impedanssi on saatu laskettua, lasketaan oikosulkuresistanssi  $R_k$ , joka on helppo laskea kuorimitushäviön  $P_K$  ja muuntajan virran  $I_n$  avulla (kaava 9.)

$$R_k = \frac{P_K}{3 \cdot I_n^2} = \frac{3690 \text{ W}}{3 \cdot (454,7 \text{ A})^2} = 5,95 \text{ m}\Omega \quad (9)$$

Induktanssin  $L_k$  laskemista varten pitää selvittää ensin reduktanssi  $X_k$  (kaava 10.)

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(25,4 \text{ m}\Omega)^2 - (5,95 \text{ m}\Omega)^2} = 24,7 \text{ m}\Omega \quad (10)$$

Induktanssin  $L_k$  laskeminen (kaava 11.)

$$L_k = \frac{X_k}{2\pi f} = \frac{24,7 \text{ m}\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 78,6 \text{ }\mu\text{H} \quad (11)$$

Oikosulkutehon  $S_k$  laskeminen (kaava 12.)

$$S_k = \frac{S_n}{Z_k(\%)} = \frac{315 \text{ kVA}}{0,05} = 6,3 \text{ MVA} \quad (12)$$

TAULUKKO 3. Kompensointiportaiden resonanssitaajuudet.

Aallon nro	Qc/kVAr	fr/Hz	n
1	50,0	561,2	11,2
2	100,0	396,9	7,9
3	150,0	324,0	6,5
4	200,0	280,6	5,6
5	250,0	251,0	5,0
6	300,0	229,1	4,6
7	350,0	212,1	4,2
8	400,0	198,4	4,0
9	450,0	187,1	3,7
11	550,0	169,2	3,4
13	650,0	155,7	3,1
15	750,0	144,9	2,9
17	850,0	136,1	2,7
19	950,0	128,8	2,6

Taulukon 3 sarakkeen fr/Hz tulokset on laskettu Kaavalla 5. Taulukosta pystytään huomaamaan, että 5. yliaalto todennäköisesti resonoi. Tämä pystytään toteamaan mittaamalla todeksi.

Estokelapariston resonanssitaajuuden laskeminen on esitetty alla olevissa kaavoissa, jossa pitää ensin laskea kondensaattoripaketin vaihevälikapasitanssin  $X_C$  arvo (kaava 13) sekä kompensointikondensaattorien tähtikytkennän kapasitanssi  $C_Y$  arvo (kaava 14.)

$$X_C = \frac{U_n^2}{Q_c} = \frac{400 \text{ V}^2}{50 \text{ kVAr}} = 3,2 \Omega \quad (13)$$

$$C_Y = \frac{1}{\omega X_{C(a)}} = \frac{1}{2\pi f X_{C(a)}} = \frac{1}{2 * \pi * 50 \text{ Hz} * 3,2 \Omega} = 994,7 \mu\text{F} \quad (14)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{1 \text{ mH} * 994,7 \mu\text{F}}} = 159,6 \text{ Hz} \quad (15)$$

## 8 MITTAUKSET

Tässä työssä mitattiin tuotantolaitoksen sähkönlaatua. Mittauksissa käytetään sähkönlaatuanalysointia Fluke 434. Analysointilaitteissa on laaja valikoima erityyppisiä mittaussivaihtoehtoja, jotka analysoivat sähköjakaajärjestelmän tilaa. Mittausvaihtoehtoja ovat mm jännitteen, virran, tehon, taajuuden, energiankulutuksen, harmoniset ja epäharmoniset yliaallot, epäsymmetria ja välkyntä. Lisäksi sillä pystytään analysoimaan jännitekuoppia ja -kohoumia, nopeita jännitteenmuutoksia, katkoksia ja transientteja.

Energiankulutuksen mittaustietoja saatiin tehtaalla tehdyistä mittauksista ja tehtaalle tulleista laskuista sekä suoraan verkkoyhtiöltä. Tehtaalle tulleissa laskuissa on ollut ylimääräisestä loistehosta johtuvaa laskua. Laskussa oli alkanut ilmetä loistehoa, kun tehtaalle oli investoitu uusia sähkölaitteita ja muutama taajuusmuuttajasyöttöinen moottori.

### 8.1 Suunnitelmat

Suunnitelmana oli selvittää, millaisia loistehoja on asiakkaan verkossa ja mitä aiheuttajia sekä mistä loisteho johtuu. Suunnittelun lähtökohtana oli se, että tehtaalle tulleissa laskuissa oli ollut ylimääräistä loistehosta johtuvaa maksua, joka yritetään saada kitketyksi. Mittauksia suunniteltaessa aloitettiin hahmottamaan tehdaskokonaisuutta pala kerrallaan eli tutustuttiin tehtaalla oleviin laitteistoihin, jotta voitaisiin aloittaa mittaukset. Aloitusvaiheessa selvitettiin kulutusmittarin toimintaperiaatteesta se, että loistehonmittaukseen vaikuttaa perusaallon lisäksi myös yliaaltojen teho. Mittaukset päädyttiin aloittamaan pääkeskustasolta, josta selviää näiden loistehojen kokonaisolemus ja -vaikutus. Kun mittausten tuloksia on tulkittu ja niistä saaduilla arvoilla on tehty laskelmia, voidaan rajata häiriöitä aiheuttavaa aluetta pienemmäksi. Aluetta rajattiin uusien taajuusmuuttajien ja pääkeskuksen välillä siten, että pääkeskukselle laitettiin toinen mittari ja taajuusmuuttajaan toinen. Tämä mittaus suoritettiin sammuttamalla taajuusmuuttaja hetkeksi ja käynnistämällä se uudelleen, jolloin selvisi sen tuottama loistehon määrä. Lisäksi aluetta rajattiin kompensoinnin ja muuntajan väliseen mittaukseen, jolloin selvisi niiden välinen vuorovaikutus.

### 8.2 Fluke 434 -mittari

Fluken analysointilaitte on mittari, jonka ominaisuuksiin on syytä perehtyä ennen käytön aloittamista. Perehtyminen on tarpeen, koska mittarissa on paljon erilaisia toimintoja ja käyttöön liittyviä asetuksia. Fluken analysointilaitteella mittaus tehtiin kytkemällä virtapihdit vaihe- ja nolla johtimien ympärille, minkä jälkeen kytkettiin jännitteen mittauksia varten jännitejohdot, jotka liitettiin 16 A voimapistorasias-adapteriin.

### 8.3 Suoritukset

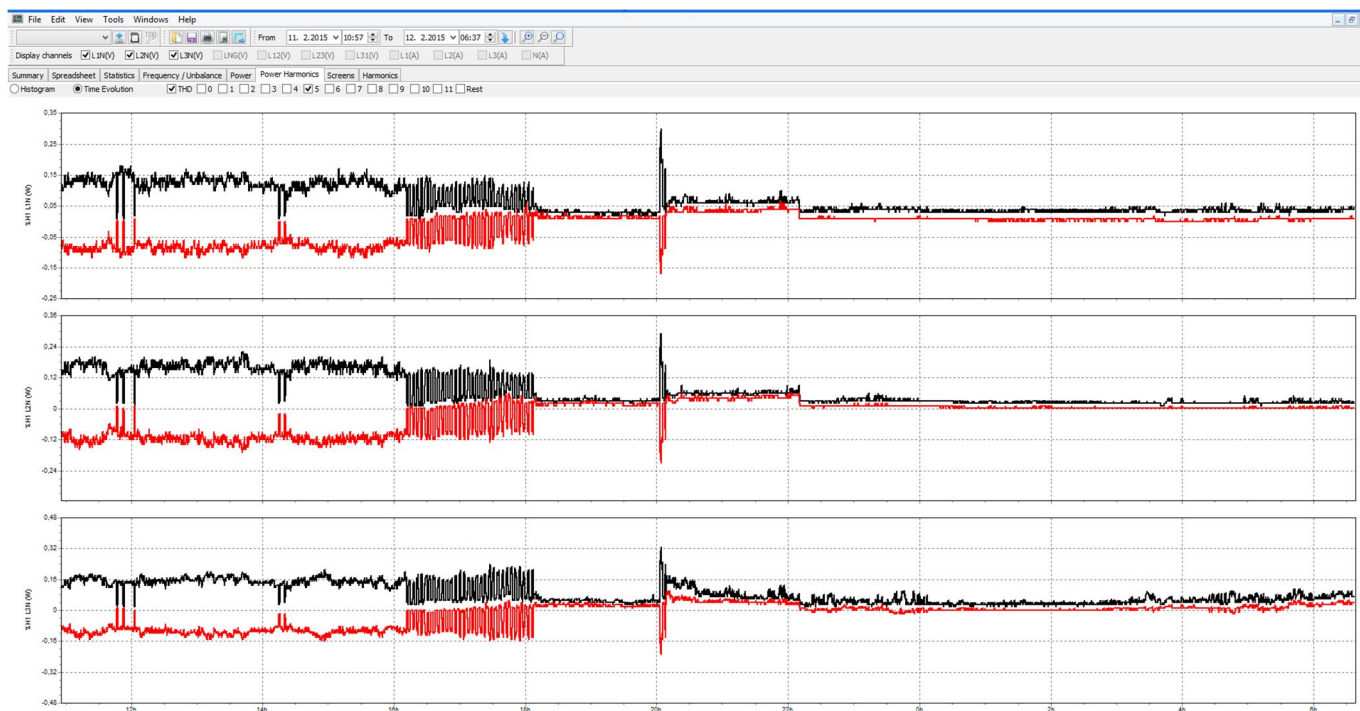
Mittaukset suoritettiin standardin SFS-EN 50160 mukaisesti. Mittalaitteella pystytään määrittämään käytössä oleva standardi, joten se määritettiin. Mittalaitteessa huomioitiin myös tarkkailtavan sähköverkon kytkentä ja vaihejännite.

Ensimmäinen mittaus otettiin uudelta sähköpääkeskukselta, joka nimettiin UPK:ksi. Tämä UPK syöttää Kojeistotien tehdashallia. Toinen mittaus otettiin toista tehdashallia syöttävältä pääkeskukselta, joka nimettiin PK:ksi. Tämä PK syöttää Ankkuritien tehdashallia. Molempien keskuksien syötöt tulevat samalta muuntajalta, mutta menevät eri rakennuksiin. Kolmas mittaus otettiin kompensoinnin ja muuntajan väliltä, jolla selvitettiin mahdollista resonointia muuntajan ja kompensoinnin välillä. Edellisten mittaustuloksien perusteella kannatti viimeinen mittaus suorittaa uusien taajuusmuuttajien ja pääkeskuksen välillä siten, että pääkeskukselle laitetaan toinen mittari ja taajuusmuuttajaan toinen mittari sekä samanaikaisesti käytetään taajuusmuuttajaa pois päältä. Näillä mittauksilla mahdollisesti selviää häiriöiden aiheuttajia sekä mahdollisesti pystytään vahvistamaan laskennan tulosta.

### 8.4 Tulokset

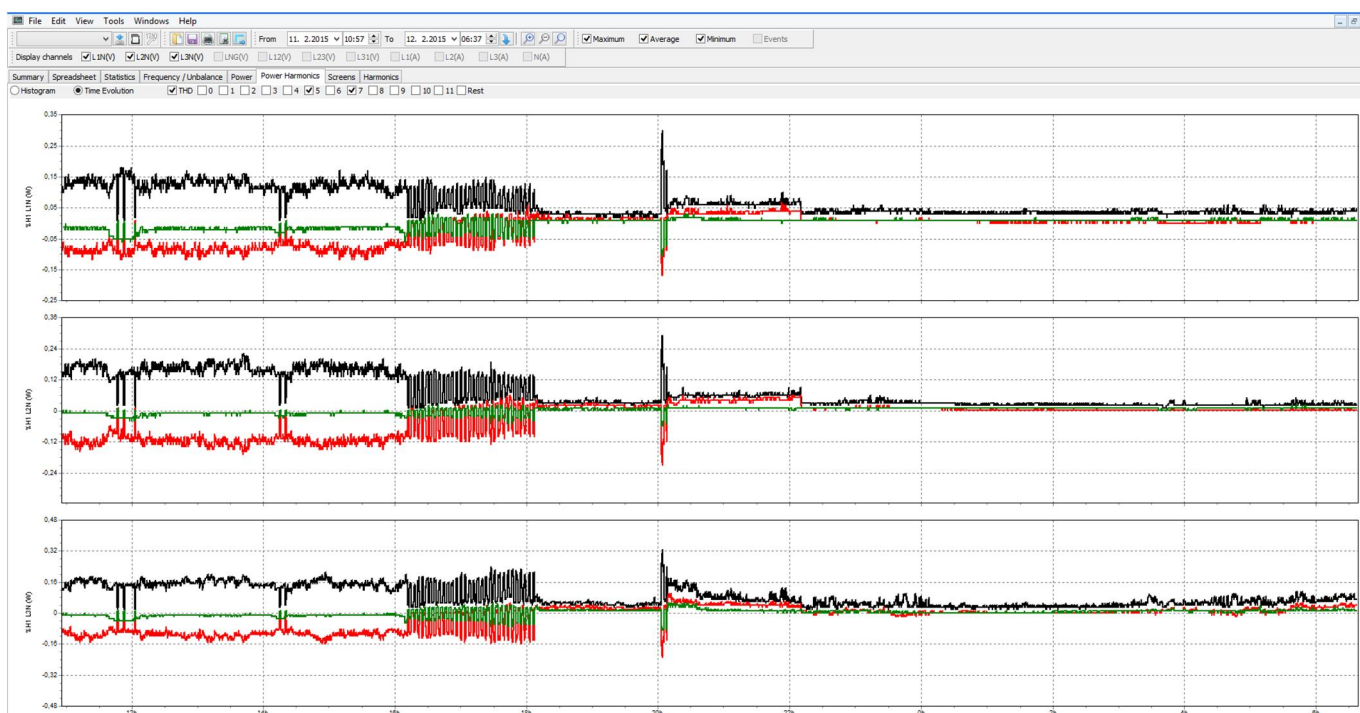
Mittaustulosten perusteella arvioin verkossa esiintyviä ongelmia. Mittaustuloksia on esitetty kuvissa 6-10 sekä liitteessä 1. Kuvista 6 ja 7 voidaan päätellä, että ongelmat johtuvat todennäköisesti 5. yliaallon aiheuttamasta yliaaltopiikistä mutta sitä ei pystytä sanomaan täysin varmaksi. Tämä yliaaltopiikki syntyy, kun tietyssä kuormitustilanteessa muuntajan ja kompensoinnin välillä tapahtuu resonointia. Minkä vuoksi loistehon määrä kasvaa hetkellisesti. Ongelma on korjattavissa estokeloilla varustetulla kompensoinnilla.

Kuvasta 6 havaitaan, että 5. yliaalto (merkitty kuvassa punaisella) todennäköisesti vaikuttaa kokonaisyliaaltoihin (merkitty kuvassa mustalla). Muiden yliaaltojen merkitys on mittauksessa vähäinen ja niitä ei ole kuvaan merkitty. Kun kuvaa verrataan kulutusmittarin tietoihin, tulokset näyttävät samansuuntaisilta, mikä vahvistaa päätelmiä.



KUVA 6. Mittauksessa kokonaisyliaalto ja 5. yliaalto uudelta pääkeskukselta. (Haataja 2015-5-26.)

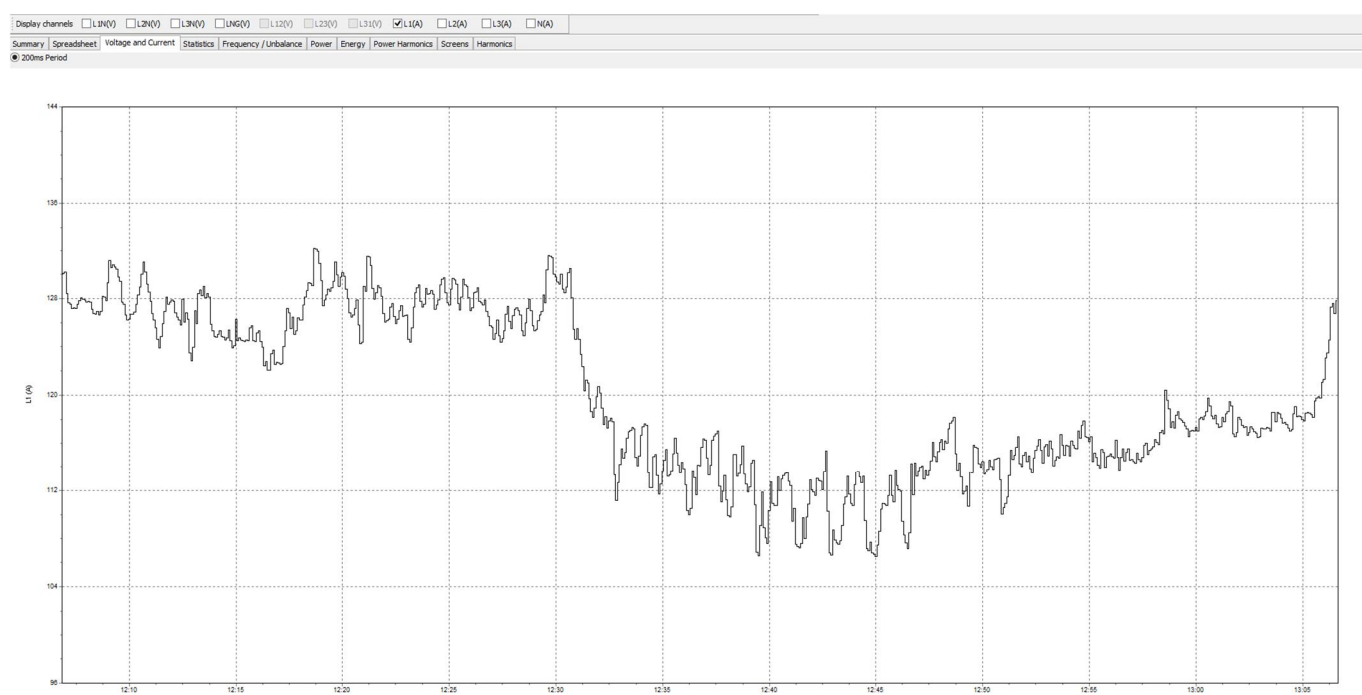
Vertailun vuoksi on alla esitetty kuva 7, jossa on kokonaisyliaalto (merkitty kuvassa mustalla) ja 5. yliaallot (merkitty kuvassa punaisella) sekä 7. yliaalto (merkitty kuvassa vihreällä). Kuva havainnollistaa 7. yliaallon vaikutusta kokonaisyliaaltoon nähden. Kuvasta havaitaan, että 7. yliaallon vaikutus on huomattavasti vähäisempi kokonaisyliaaltoon, kuin 5. yliaallon.



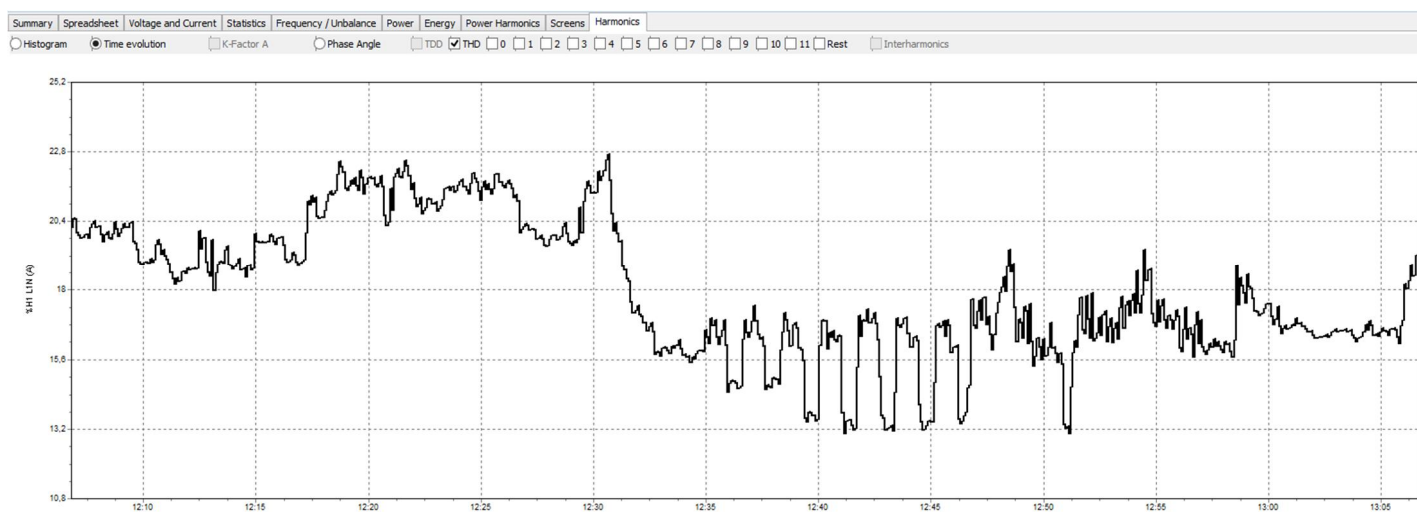
KUVA 7. Mittauksessa kokonaisyliaalto ja 5. yliaalto sekä 7. yliaalto uudelta pääkeskukselta. (Haataja 2015-6-02.)



Kuvissa 8,9 ja 10 havainnollistetaan viimeisen mittauksen avulla, miten virrat käyttäytyvät tietyllä ajanhetkellä, kun kuormitusta muutetaan. Kuvat ovat samalta ajanjaksolta ja samasta mittauspisteestä sekä samalta vaiheelta. Kuvassa 8 on esitetty kokonaisvirta ja kuvassa 9 on esitetty THD:n virta sekä kuvassa 10 on esitetty 3. 5. ja 7. yliaaltovirta. Mittauksen aikana noin puolenvälin kohdalla on sammutettu taajuusmuuttaja kuormaa vähemmäksi. Kokonaisvirtaan ja THD:n virtaan taajuusmuuttaja kuorman vähentäminen vaikuttaa sillä tavalla, että ne tippuvat selvästi. 5. yliaaltovirtaan taajuusmuuttaja kuorman vähentäminen vaikuttaa sillä tavalla, että se kasvaa selvästi. 3. ja 7. yliaaltovirta pysyvät nollassa mittauksen ajan. THD:n virta sisältää yliaaltovirrat ja kokonaisvirta on perusaallonvirta. Kuvissa kokonaisvirta ja THD:n virta käyttäytyvät loogisesti, mutta samaan aikaan 5. yliaaltovirta käyttäytyy eritavalla. Mittauksessa 5. yliaalto käyttäytyy kummallisesti, joten jotain epäilyttävää tapahtuu verkossa. Mittaustuloksista ei pystytä sanomaan ongelmaa täysin varmaksi.

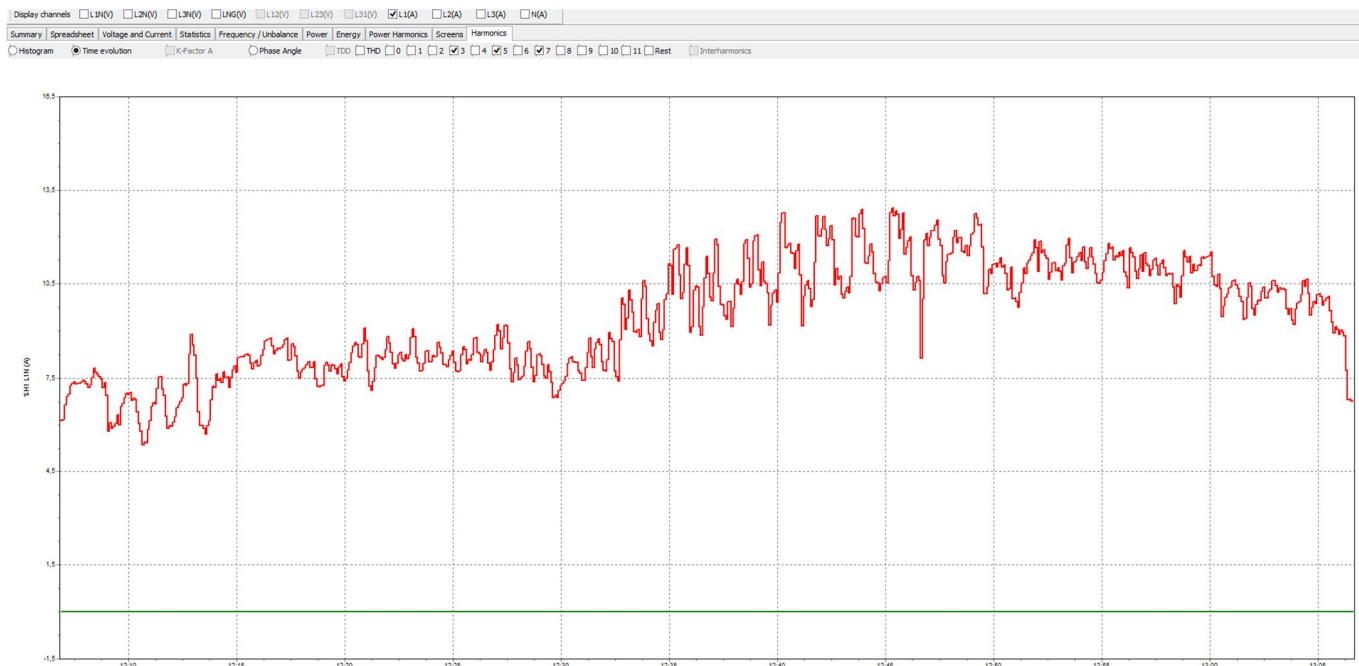


KUVA 8. Mittauksessa kokonaisvirta L1 uudelta pääkeskukselta. (Haataja 2015-6-03.)



KUVA 9. Mittauksessa THD:n virta L1N uudelta pääkeskukselta. (Haataja 2015-6-03.)





KUVA 10. Mittauksessa 3. 5. ja 7. yliaaltovirta uudelta pääkeskukselta. (Haataja 2015-6-03.)

Mittaustuloksista on liite, jossa on kahdella ensimmäisellä sivulla esitetty hetkellismittaus verkon jännite- ja virtakäyrien muodoista. Näistä kuvista nähdään, että jännitteen muoto on kohtalainen mutta virran muoto on huomattavasti vääristynyt. Liitteessä kaksi viimeistä sivua ovat Kokonaisyli-aallon vertaamista viidenteen yliaaltoon, joissa nähdään mahdollinen yhteys. Näistä ensimmäinen kuva on Kojeistotien uudelta pääkeskukselta otettu mittaus ja jälkimmäinen on Ankkuritien pääkeskukselta.

## 9 YHTEENVETO

Insinööritoiminnan tarkoituksena oli selvittää Kuopion Woodi Oy:n tehdashallien sähkönlaadussa ilmenneitä ongelmia. Ongelmia oli ilmennyt, kun tehtaalle oli investoitu uusia sähkölaitteita ja muutama taa-juusmuuttajasyöttöinen moottori. Työssä on sähkönlaadun selvitysten avulla tutkittu verkon tila ja kartoitettu mahdollisia ongelmia. Työssä tutkittiin laajalti sähkönlaadun ongelmien teoreettisia taustoja, jotta ongelmat voitiin selvittää. Teoriassa käytiin läpi sähkönlaadun, sähköverkon tehoja ja loistehon kompensointia.

Sähköverkon ominaisuuksien selvittämiseksi tutustuttiin tehtaalla oleviin laitteisiin ja laitteistoihin. Tehtaalla kirjattiin muistiin laitteistojen valmistajia ja laitteiden arvoja, joiden perusteella oli helppoa etsiä tietoa laitteistoista sekä tutustua niiden sisältöön. Sähköverkon lähtötietojen selvittämiseksi otettiin yhteyttä myös verkkoyhtiöön, josta selvisi kiinteistöä syöttävän muuntajan kilpiarvot ja kulusmittarien tiedot.

Muuntajan ja kompensoinnin ominaisuuksien perusteella määritettiin laskennallisesti niiden herkkyyttä häiriöille. Laskemalla ja mittaamalla saaduista verkon mallintamistilanteista tehtiin sähkönlaadun ongelmien arviointi. Työssä suoritettiin tuotantolaitoksen sähkönlaatu mittauksia. Mittauksissa käytettiin Fluke 434 -sähkönlaatuanalysointilaitetta. Mittariin tutustuttiin huolella.

Laskennan ja mittauksien avulla asiakkaalle esitettiin mahdollisesti oleva ongelma ja tehtäviä toimenpiteitä. Työn tuloksena esitettiin todennäköisesti yliaaltopiikistä johtuvaa ongelmaa mutta sitä ei pystytty sanomaan täysin varmaksi. Tämä yliaaltopiikki syntyy, kun tietyssä kuormitustilanteessa muuntajan ja kompensoinnin välillä tapahtuu resonointia, minkä vuoksi loistehon määrä kasvaa. Tämä ongelma on korjattavissa estokeloilla varustetulla kompensoinnilla. Tuloksena syntyi kattava raportti teollisuuslaitoksen sähkönlaadusta.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus. [Viitattu 2015-03-26.] Saatavissa:

[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/09\\_0\\_Loistehon%20kompensointi%20ja%20yliaallot.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/09_0_Loistehon%20kompensointi%20ja%20yliaallot.pdf)

ALANEN, Raili ja HÄTÖNEN, Hannu 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta. [Viitattu 2015-03-20.] Saatavissa: <http://www2.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>

KORPINEN, Leena, MIKKOLA, Marko, KEIKKO, Tommi, FALCK, Emil 2008. Yliaalto-opus. Verkkodokumentti. [Viitattu 2015-04-07.] Saatavissa:

<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>

MOILANEN, Jani 2013. Kompensoinnin vianetsintä ja sähkönlaatumittaukset talvivaaran kaivoksella. Savonia-ammattikorkeakoulu. Sähköalan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2015-03-23.] Saatavissa: [http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/59111/Moilanen\\_Jani.pdf?sequence=3](http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/59111/Moilanen_Jani.pdf?sequence=3)

MÄNNISTÖ, Matti 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.

RUPPA, Erkki 2001. Yliaallot. [Viitattu 2015-03-27.] Saatavissa:

<http://salabra.tp.samk.fi/er/siirto/yliaallot.doc>

SÄHKÖTEKNIIKAN PERUSSTANDARDIT 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. SFS-EN 50160. Vahvistettu 2010. 4. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

VIITALA, Jaakko 2006. ST-kortti 52.50. Sähkön laatu. Käsitteet ja vaatimukset. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Julkaistu 26.5.2006. [Viitattu 2015-03-25.] Saatavissa:

<http://severi.sahkoinfo.fi/item/616?search=52.50>

VIITALA, Jaakko 2006a. ST-kortti 52.51.03. Sähkön laatu. Harmoniset yliaallot. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Julkaistu 26.5.2006. [Viitattu 2015-03-25.] Saatavissa:

<http://severi.sahkoinfo.fi/item/613?search=52.51.03>

VIITALA, Jaakko 2006b. ST-kortti 52.51.04. Sähkön laatu. Vinokuormitus, nollajohdin ja transienttiyläjännitteet. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Julkaistu 26.5.2006. [Viitattu 2015-03-25.] Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/item/617?search=52.51.04>

VOIPPIO, Erkki. 2006. Virtapiirit ja verkot. Helsinki: Otatieto Oy.

## LIITE 1: MITTAUSTULOKSET

